

漸増载荷による圧密とセメンテーションが同時に進行するときの粘土の圧縮特性

Compression Behavior of Clay under Increasing Consolidation Pressure Accompanied with Cementation

土田 孝 Takashi TSUTIDA (広島大学大学院工学研究科)  
 平原 毅 Tsuyoshi HIRAHARA (広島大学大学院工学研究科)  
 竹信 正寛 Masahiro TAKENOBU ((独)港湾空港技術研究所)

大阪湾の洪積粘土地盤などのように堆積年代が古い粘土地盤では、同じ圧密圧力に対して若齢の地盤よりも高い間隙比の状態では、埋立などの载荷によって圧密降伏圧力を越えた応力が加わったときに大きな圧縮性を示すことが知られている。高間隙比の地盤が形成された一因として、堆積による自重圧密中にセメンテーション（凝結）効果が発現することが考えられるが、そのメカニズムは明らかになっていない。本研究は、セメンテーション効果を伴って堆積し自重圧密した年代の古い地盤を室内で再現し地盤の形成過程を明らかにすることを目的としている。粘土に少量のセメントを添加し、圧密とセメンテーションが同時に進行するときの粘土の圧縮特性を検討するとともに、自然粘土地盤の形成過程との対応について考察を行った。

キーワード：年代効果，セメンテーション，海成粘土，圧密 (IGC : B06, E02, M05)

1. 海成粘土地盤における堆積時のセメンテーションとその影響

非常に長い地質学的な年代を経て堆積した自然の海底地盤では、その強度や圧密・圧縮特性は、圧密時の有効応力のほか土の物理化学的性質や堆積過程の環境によっても大きく影響を受けることがわかっている。これらの影響は、主に有効応力一定のもとでの長期的な沈下である二次圧縮（遅延圧縮）と、間隙比と無関係に強度が発現するセメンテーション（凝結）効果とに分けられ、両者は年代効果（aging, エージング）と総称される<sup>1)2)</sup>。

近年、沿岸域の建設事業が沖合に展開するとともに、深部の洪積粘土の強度・変形特性の評価が問題になってきているが、これらの粘土地盤では数万年から数十万年前に堆積しているため年代効果の影響が工学的にも無視できないものとなっている。

図-1 は大阪湾泉州沖積粘土地盤における圧密降伏圧力  $p_c$  と有効土被り圧  $\sigma_{v0}'$  の比から求めた過圧密比と深度の関係である。図-1 のように過圧密比は 1.0~2.5 の範囲にあるが、地質学的にみると大阪湾の沖積粘土層は一貫して堆積が継続した正規圧密状態と考えられている。したがって、図-1 の過圧密は年代効果による見かけの過圧密である。

図-2 は大阪湾洪積粘土、沖積粘土の圧縮比  $C_c/(1+e_0)$  と自然含水比の関係である<sup>3)</sup>。図中には、Lambe and Whitman<sup>4)</sup>による圧縮比の範囲と、小川・松本によるわが国の港湾地域の沖積粘土の範囲<sup>5)</sup>を比較のため示している。図-2

のように大阪湾沖積粘土の圧縮比はLambe and Whitmanの範囲よりやや大きく、0.2~0.4の範囲にあるが、大阪湾の洪積粘土ではそれらをはるかに上回った値を示している。なお、洪積粘土の二次圧縮指数  $C_\alpha$  は沖積粘土と同様に、 $C_\alpha=0.03\sim0.06C_c$  の関係にあるので、二次圧密量を示す  $C_\alpha/(1+e_0)$  についても、洪積粘土は通常の沖積粘土よりはるかに大きい。

このように、大阪湾の洪積粘土は通常の沖積粘土地盤に比べて明らかに大きな圧縮性を有しているが、同様の傾向は有明粘土の場合にもみられる<sup>7)</sup>。土田は、その原因を堆積過程で構造が発達し高い間隙状態で堆積しているためと考え、一般的な海底地盤の土被り圧と間隙比の関係を示

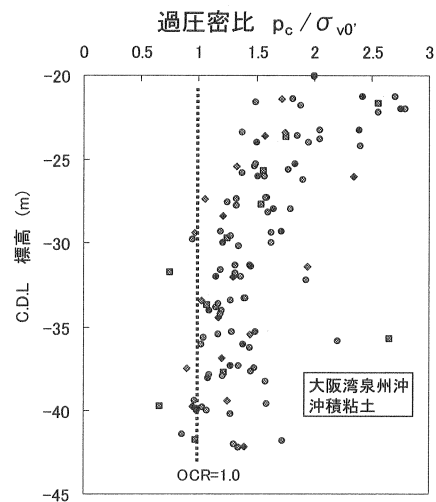


図-1 大阪湾沖積粘土の過圧密比と深度の関係

す基準圧縮曲線 (Standard compression curve, SCC) を提案し、基準圧縮曲線を用いて大阪湾粘土の構造の定量評価を試みている<sup>6)</sup>。

基準圧縮曲線は、多数の海成粘土の圧密試験結果を整理し、特定の初期間隙比で繰り返した状態から圧密を開始したときの空隙比と圧密圧力の関係を定式化したものである。基準圧縮曲線では空隙比のかわりに、粘土の体積比  $f (=1+e)$  を液性限界のときの体積比  $f_L$  を用いて、次式で正規化した体積比指数  $I_{sv}$  を用いる。

$$I_{sv} = \frac{\ln f}{\ln f_L} \quad (1)$$

基準圧縮曲線は、 $I_{sv}$  と地盤に作用する有効圧密圧力  $p$  (単位 kPa) の関数として次式で与えられる。基準曲線を決定するパラメータは、粘土が海底面に堆積して自重圧密が開始するときの空隙比と体積比をそれぞれ  $e_0^*$ ,  $f_0^*=1+e_0^*$  と、液性限界の時の空隙比  $e_L$ 、繰返し状態での強度増加率 (繰返し状態で粘土が保持する有効応力に対する粘着力の比)  $(s_u/p)_{REM}$  である。

$$\left. \begin{aligned} & p < R^{2.5} p^* \text{ のとき} \\ & I_{sv} = 1.47 - 0.27 \log_{10} p - 0.00186 (\ln R) \left\{ \frac{\ln(p/p^*)}{\ln R} - 2.5 \right\}^2 \\ & p > R^{2.5} p^* \text{ のとき} \\ & I_{sv} = 1.47 - 0.27 \log_{10} p \\ & \text{ただし,} \\ & R = \frac{10^{(5.44-3.70I_{sv0})} (s_u/p)_{REM}}{1.4(e_0^*/e_L)^{4.5}} \\ & p^* = \frac{1.4}{(e_0^*/e_L)^{4.5} (s_u/p)_{REM}} \quad I_{sv0}^* = \frac{\ln f_0^*}{\ln f_L} \end{aligned} \right\} (2)$$

粘土が海底に堆積して圧密を開始するときの空隙比  $e_0^*$  は液性限界  $e_L$  の 1.5 倍から 2 倍と考えられるので<sup>6)</sup>、この条件で基準圧縮曲線を計算すると、 $I_{sv}$  と  $p$  の関係は液性限界によってそれほど変化せず、ほぼそれぞれ 1 つの線で表すことができる<sup>6)</sup>。このようにして求めた基準圧縮曲線  $SCC(e_0^*=1.5e_L)$ ,  $SCC(e_0^*=2e_L)$  は、粘土が正規圧密状態で一次的に圧密するときの圧力と空隙比の基準的な関係であり、この値よりも空隙比が大きいときは、セメンテーションなどの化学的な作用によって高空隙比状態を維持する構造が発達していると判断される。

図-3 は、沖積海底地盤の各深度における原位置での体積比指数  $I_{sv0}$  と有効土被り圧  $\sigma_{v0}'$  の関係である<sup>7)</sup>。図-3 をみると有効土被り圧 50kPa 以下では多くのデータが  $e_0^*=1.5e_L$  とした時の基準圧縮曲線の前後にあるが、特に有

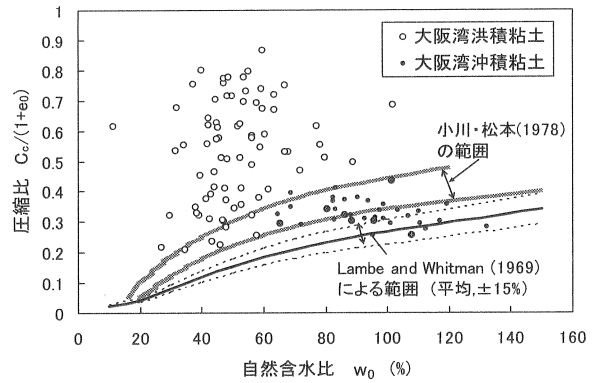


図-2 含水比と圧縮比の関係

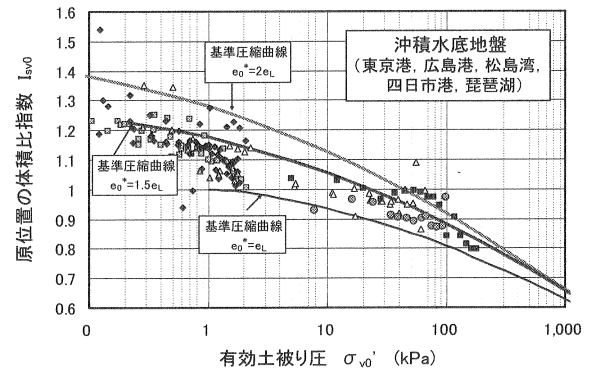


図-3 沖積水底地盤における原位置体積比指数  $I_{sv0}$  と有効土被り圧  $\sigma_{v0}'$  の関係

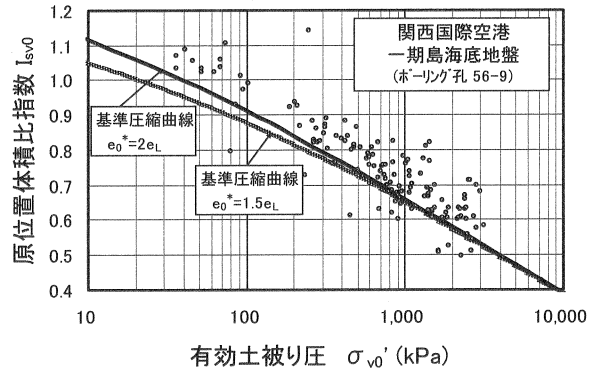


図-4 関西国際空港建設地点における原位置での体積比指数  $I_{sv0}$  と有効土被り圧  $\sigma_{v0}'$  の関係

効土被り圧が  $50\text{kN/m}^2$  を越える範囲 (海底地盤の深度 10m 以深) では原位置の空隙比を表す  $I_{sv0}$  が基準圧縮曲線よりも大きいデータが数多く見られるようになっている。このことは、堆積後の経過時間が大きい沖積粘土において構造の発達がみられることを示唆している。

図-4 は、関西国際空港一期島建設地点における建設前の海底粘土地盤の有効土被り圧と原位置体積比指数の関係である。図-4 をみると、海底地盤の原位置体積比指数の多くが基準圧縮曲線よりも大きい。このことは、有効土被り圧に対して何らかの原因で空隙比が高い状態で堆積

していることを示している。図-5 はこのような状態で堆積している大阪湾洪積粘土試料を圧密試験したときの典型的な  $e$ - $\log p$  関係である。図-5 のように圧密圧力が圧密降伏応力を越えるときに大きな圧縮性を示しており、その後  $e$ - $\log p$  関係の勾配は小さくなって最終的に基準圧縮曲線に戻っていく。このような地盤に埋立等により大きな荷重が作用すると、もともと高間隙比の状態では堆積しているため、圧密圧力が圧密降伏圧力を越えたときに大きな沈下が生じるのである。関西国際空港の埋立では、洪積粘土層において当初の想定を大幅に上回る沈下が発生したが、その原因の一つとしてこのような高間隙比状態で堆積している洪積粘土地盤の圧縮特性を十分に把握できなかったことが上げられる。

それでは大阪湾洪積粘土地盤において、なぜ間隙比が高い状態で地盤が堆積しているのであろうか。この原因は十分な説明が得られていないが、一つの仮定として圧密過程において粘土中の炭酸カルシウムなどのセメンテーション物質による固化がゆっくりと進行したことが考えられる。すなわち、固化によって強化された骨格が体積による上載圧の増加に抵抗するため、高間隙比の状態が形成されたとするものである。しかし、このような圧密とセメンテーションが同時に進行するときの粘土の圧縮特性はほとんど調べられていない。本研究では、粘土に少量のポルトランドセメントを添加し、セメンテーションと圧密が同時に進行するときの粘土の圧縮特性を実験的に調べた。

## 2. 少量のセメントを添加した粘土試料の段階載荷圧密試験結果

### 2.1 実験に用いた粘土とセメント添加量

実験には広島港出島粘土と市販の普通ポルトランドセメントを用いた。広島港出島粘土の物理特性を表-1 に示す。また、粘土の初期含水比は、海底地盤が堆積するときの初期条件と考えられる  $1.5w_L$  とした。

高含水比の粘土にセメントを添加したときの強度発現を調べた Tanら<sup>8)</sup>によると、セメント添加後の粘土の一軸圧縮強度  $q_u$  とセメント含有量  $C$  の関係は以下のように表すことができる。

$$q_u = \alpha(C - C_0) \quad (3)$$

式 (3) において  $C_0$  は強度発現に必要な最低セメント量、 $\alpha$  は定数であり、いずれも粘土の種類によって異なる。(3) 式は、最低セメント量  $C_0$  を越えないとセメント添加による強度発現がほとんど認められないことを示している。本

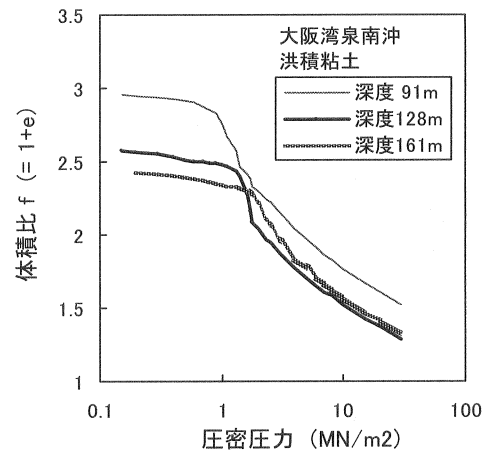


図-5 大阪湾洪積粘土の典型的な  $e$ - $\log p$  関係

表-1 広島港出島粘土の物理特性

液性限界 $W_L(\%)$	塑性限界 $W_P(\%)$	塑性指数 $I_p$	土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$
97.1	40.7	56.4	2.653

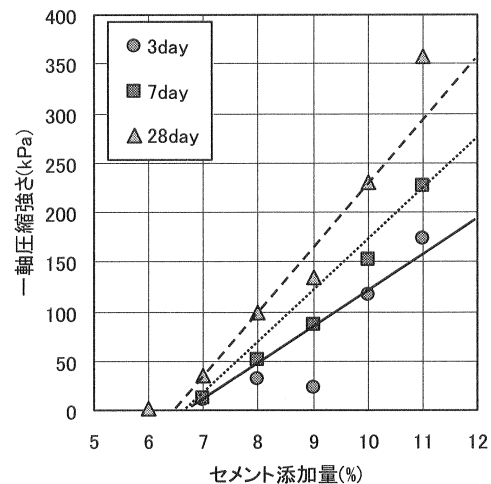


図-6 セメント添加量と一軸圧縮強度

研究は自然地盤が堆積する際に徐々に発現するわずかな固化をセメント添加により再現することを目的としているので、上記の  $C_0$  値を求め  $C_0$  値前後のセメント量を添加することとした。

図-6 はセメント添加量と一軸圧縮強度の関係である。

図-6 のように広島港出島粘土の場合では、強度発現が始まる添加量  $C_0$  は約 6.7%であった。これより基本の添加量を 5%とし、比較のため添加量 7%の場合についても実験を行った。なお、粘土にセメントを添加してセメント処理土とする場合は、地盤の強度として一軸圧縮強度は少なくとも 200kPa 程度が必要となるので、室内配合試験で 28 日強度 400~600 kPa のセメント量を添加する。図-6 の条件

では添加量として12%以上が用いられることになる。本研究で添加したセメント量はセメント処理土に用いられる量の半分程度である。

試料作成と実験の方法は以下のとおりである。

- (1)0.45mmのふるいを通過した広島港出島粘土を十分に練返し、初期含水比が145%になるように調整する。
- (2)乾燥質量比が5%あるいは7%となるように、ポルトランドセメントの質量を計量し、セメントの質量と同じ質量の水を混合してセメントスラリーを作成する。
- (3)粘土とセメントスラリーを混合し、ハンドミキサーで攪拌する。次に、真空ミキサーに投入し5時間脱気しながら攪拌する。
- (4)攪拌した試料を円形モールドにつめて圧密養生を行う。一定の圧密圧力下において所定の日数養生した後試料を容器から取り出す。
- (5)試料を用いて段階荷重による圧密試験を行う。

表-2は圧密養生に用いた条件である。養生は室温(22~23℃)で実施し、各圧密圧力49, 98, 196kPaのもとで1, 3, 7, 14日の養生を行った。所定の圧力までは、荷重板の重量、12.25, 24.5, 49kPaと段階的に圧密圧力を増加させたが、段階ごとに $\sqrt{t}$ 法によって90%沈下量 $d_{90}$ を確認した後に次段階の荷重を行った。最終圧密圧力を加えた後に $\sqrt{t}$ 法で100%圧密終了時刻を求め、この時間からの日数を養生日数とした。

所定の養生日数に達した後に、試料を取り出し、段階荷重による圧密試験を実施した。本試験では養生期間と圧密特性の関係に着目したが、圧密試験に時間を要するとその間にセメンテーションが進行する可能性がある。このため、圧密試験では標準圧密試験と同様の圧密圧力を用いたが、各段階で $\sqrt{t}$ 法によって得られた一次圧密終了時間に達した時点で直ちに次の圧密圧力を荷重した。全段階荷重の圧密試験に要した時間は90分から120分であった。

表-2 圧密養生条件

養生日数	圧密圧力 $p_0$		
1day	49kpa	98kPa	196kPa
3day			
7day			
14day			

## 2.2 セメント5%を添加した粘土試料の圧密特性

図-7は、セメント5%を添加し98kPaで圧密養生した試料の $e$ -log  $p$ 曲線の比較である。図-7のように、 $e$ -log  $p$ 曲線は養生日数とともに間隙比が大きくなる方向に移動している。これは養生中にセメンテーション(固化)が進行し強度が増加することにより、予圧密終了後の供試体が高

間隙比状態になったためである。養生期間が同じ供試体については、圧密圧力が異なる場合でも、正規圧密領域では $e$ -log  $p$ 関係は一本の線にほぼ収束した。すなわち、セメントを5%添加させた場合の正規圧密状態での圧縮特性は、養生期間が同程度ならば圧密圧力によらずほぼ同じであった。この最終的に収束する線からも、圧密養生時間が長いほど間隙比の大きい方に移動することがわかる。図-5に示すように、年代効果による構造を有する粘土では圧密

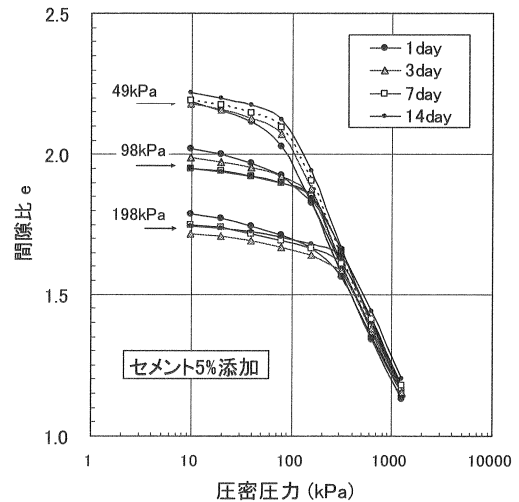


図-7 e-log  $p$  曲線 (セメント添加5%)

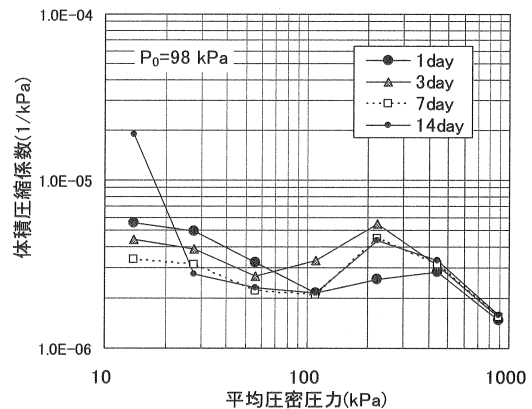


図-8 体積圧縮係数(養生時圧密圧力 98kPa)

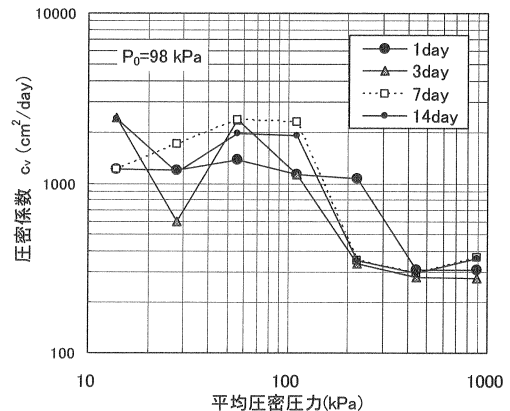


図-9 圧密係数(養生時圧密圧力 98kPa)

降伏圧力直後の圧縮性が非常に大きく、 $e$ - $\log p$  曲線が下に凹の形状を示す。図-7 をみると今回セメント添加した試料では養生時間とともに圧密降伏圧力が増加するが、 $e$ - $\log p$  曲線の形状に関しては大きな変化がみられなかった。セメント添加により自然粘土のセメンテーション効果を再現する上ではこの点を今後さらに検討する必要がある。

図-8 は、98kPa で養生した試料における圧密圧力と体積圧縮係数の関係である。図-8 のように、養生日数が長くなるほど、全体として体積圧縮係数が減少しているが、圧密圧力が十分大きくなった正規圧密領域では圧密圧力と体積圧縮係数の関係がほぼ一つの直線に収束している。

図-9 は、98kPa で圧密養生した試料における圧密圧力と圧密係数の関係である。図-9 のように、圧密係数は過圧密領域で  $1,000 \sim 2,000 \text{ cm}^2/\text{day}$  の範囲にあり、正規圧密領域では養生時間によらずほぼ  $300 \text{ cm}^2/\text{day}$  で一定となっている。このように正規圧密領域で圧密係数が過圧密領域での値の  $1/8 \sim 1/10$  程度の値で一定となる傾向は通常の粘土試料とほぼ同様である<sup>9)</sup>。

図-10 は 98kPa で圧密養生した試料における圧密圧力と透水係数の関係である。通常の粘土試料と同様に透水係数の対数と圧密圧力の対数はほぼ直線関係がみられた。

以上の図-7～図-10 は、少量のセメントを加えても基本的に圧密特性は通常の粘土とほぼ同様であることを示している。

### 2.3 養生日数と圧密降伏応力の関係

図-11 (a), (b) はそれぞれセメント添加 5%, 7% のときの圧密降伏応力と圧密養生時間の関係である。図-11 (a), (b) のように、いずれのセメント添加率においても圧密養生時間の対数に対してほぼ直線的に圧密降伏応力は増加している。図-12 (a), (b) は図-11 を過圧密比と圧密養生時間

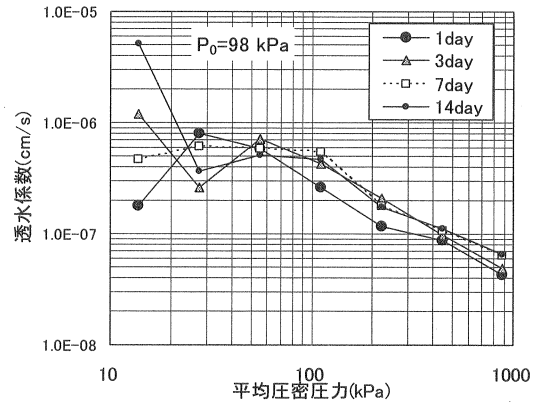
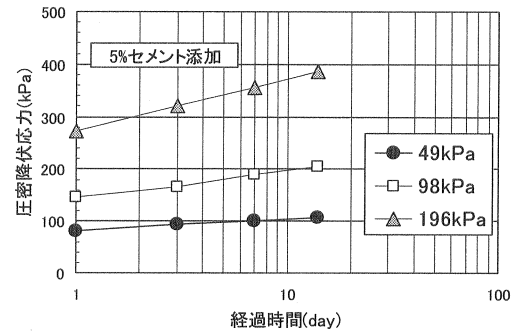
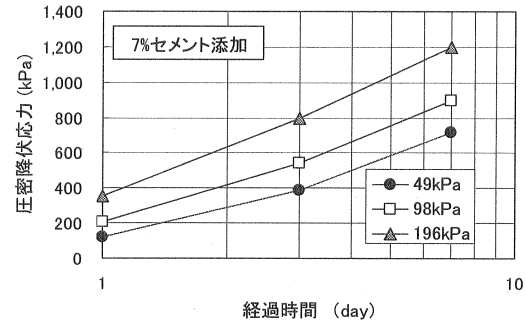


図-10 透水係数(養生時圧密圧力 98kPa)

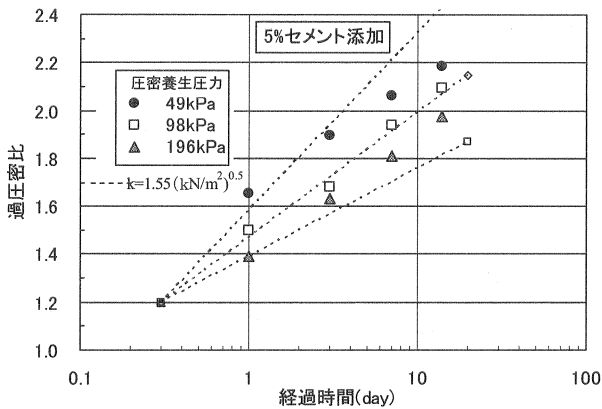


(a) 5%セメント添加

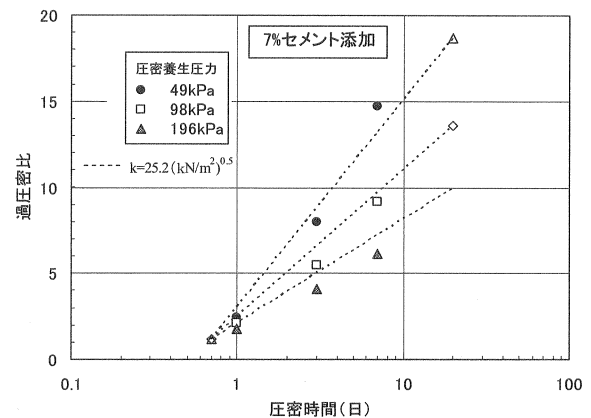


(b) 7%セメント添加

図-11 圧密降伏圧力と養生時間の関係



(a) 5%セメント添加



(b) 7%セメント添加

図-12 過圧密比と圧密養生時間の関係

との関係として示したものである。なお、ここでは一次圧密終了直後に次段階を載荷する急速載荷による圧密試験を実施しているため、セメンテーションがない場合でも圧密降伏圧力は先行圧密圧力の 1.2 倍程度になる。したがって、過圧密比 1.2 を基準として過圧密比の増加を考えた。図-12 より、セメント添加率 5% では 14 日間で過圧密比は最大 2.2 となっているが、この値は図-1 に示した大阪湾沖積粘土における見かけの過圧密の値に近い。

Tan and Tsuchida<sup>10)</sup>は、圧密終了後の粘土のせん断強度の増加をせん断強度の増加を室内実験によって調べ、一定の有効応力のもとでは、セメンテーションによる強度の増加は時間の対数に比例して発現することを示した。さらに、経過時間が 10 倍になるときのせん断強度増加  $\Delta\tau$  はそのときの有効土被り圧  $\sigma_{v0}'$  の関数となっているとして、次式を提案した。

$$\frac{\Delta(\tau/p_0)}{\Delta(\log_{10}(t/t_0))} = \frac{k}{\sqrt{p_0}} \quad (4)$$

あるいは、

$$\Delta\tau = k\sqrt{p_0}\Delta\left(\log_{10}\left(\frac{t}{t_0}\right)\right) \quad (5)$$

ここに  $k$  はセメンテーションによる強度増加を表すパラメータであり、 $t_0$  は一次圧密終了時の時間である。Tan and Tsuchida<sup>10)</sup>は東京湾粘土、大阪湾粘土の値として  $k=0.3 \sim 0.4(\text{kPa})^{0.5}$  を報告しており、竹信ら<sup>11)</sup>は広島港粘土の  $k$  値がほぼ  $0.4(\text{kPa})^{0.5}$  であるとしている。

(4)、(5)式は、セメンテーションによる強度発現が有効土被り圧が大きいほど大きいことを示すが、土被り圧との相対関係をみると、土被り圧が小さい場合ほど、セメンテーションによる強度発現が全体の強度の中で占める比重が大きいことを意味する。(5)式を用いて、セメンテーションによる見かけの過圧密比と  $k$  の関係を求める。(5)式より、強度増加率  $s_u/p$  を用いると、強度増分  $\Delta\tau$  による圧密降伏圧力の増加分  $\Delta p_c$  は、

$$\Delta p_c = \frac{\Delta\tau}{(s_u/p)} = \frac{k\sqrt{p_0}\Delta\left(\log_{10}\left(\frac{t}{t_0}\right)\right)}{(s_u/p)} \quad (6)$$

である。これより圧密圧力  $p_0$  で長時間圧密したときの正規圧密粘土のセメンテーションによる見かけの過圧密比 OCR は以下ようになる。

$$OCR = \frac{p_0 + \Delta p_c}{p_0} = 1 + \frac{k \cdot \Delta\left(\log_{10}\left(\frac{t}{t_0}\right)\right)}{\sqrt{p_0} \cdot (s_u/p)} \quad (7)$$

図-12(a)、(b)より、 $s_u/p=0.3$  としてセメント添加率 5%、

7%のときの  $k$  を求めると、それぞれ平均値として 1.55、 $25.2(\text{kPa})^{0.5}$  と求められた。図-12(a)、(b)には  $k=1.55(\text{kPa})^{0.5}$ 、 $25.2(\text{kPa})^{0.5}$  としたときの過圧密比と圧密養生時間の関係を点線で示しているが、平均的には実験値と一致している。

以上のように、セメンテーションによる強度発現と見かけの過圧密を式(4)~(7)に当てはめると、広島港粘土はセメントを添加したことにより、 $k$  値が添加率 5%のときに  $1.55(\text{kPa})^{0.5}$ 、添加率 7%のときに  $25.2(\text{kPa})^{0.5}$  まで増加したといえる。広島港粘土の本来の  $k$  値を  $k_0$  とすると、セメントを添加することで  $k$  値が  $k_0$  から  $k^*$  に増加した場合、強度開始時間  $t_0$ 、養生時間  $t$  におけるセメンテーションによる強度発現  $\Delta\tau$  は(5)式を用いて次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta\tau &= k^* \sqrt{p_0} \Delta\left(\log_{10}\left(\frac{t}{t_0}\right)\right) = k_0 \sqrt{p_0} \Delta\left(\log_{10}\left(\frac{t}{t_0}\right)^{k^*/k_0}\right) \\ &= k_0 \sqrt{p_0} \Delta\left(\log_{10}\left(\frac{t_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{k^*/k_0}}{t_0}\right)\right) \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式は  $k$  値が  $k_0$  から  $k^*$  に増加することによる強度増加が、 $k$  値が  $k_0$  のままで養生時間が次式の  $t^*$  にであったときの強度増加と等しいことを表している。

$$t^* = t_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{k^*/k_0} \quad (9)$$

セメントを 5% 添加した場合には  $t_0 = 7.2$  時間、 $k=1.55(\text{kPa})^{0.5}$  であるので、経過時間 1 日において  $t^*$  を計算すると以下ようになる。

$$t^* = t_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^{k^*/k_0} = 7.2 \cdot \left(\frac{24}{7.2}\right)^{55/0.4} = 765 \text{ 時間} \quad (10)$$

(10)式から、圧密降伏応力を一致させることで換算するならば、広島港粘土にセメントを 5% 添加させることにより養生時間 1 日で 765 時間分のセメンテーション効果を発現させたことを示している。

### 3. 荷重増加による圧密とセメンテーションが同時に起こるときの $e$ - $\log p$ 関係

#### 3.1 実験方法

海底に粘土が堆積する速度は一般に年間 0.1~10mm であるとされている。わが国の多くの沖積粘土地盤は 3000~6000 年かかって層厚 20~30m で堆積しており、洪積粘土地盤の堆積年代は数万年から数十万年と推定されている。このような実験室で与えられる載荷速度に比べはるかにゆっくりした堆積の過程において、粘土は上載荷重の増加による圧密とセメンテーションが同時に進行しながら、地盤を形成すると推定される。

海底地盤が一定の速度で堆積し、同時にセメンテーショ

ンが進行する過程を実験室内で再現するため、セメント添加率 5%, 7% の試料を用いて以下の条件で漸増荷荷圧密試験を行った。

(1) 定速度段階荷荷圧密：圧密圧力の増加量  $\Delta p$  を 27.7kPa と固定し、 $p=9.8\text{kPa}$  から  $p=392\text{kPa}$  まで 15 段階で圧密圧力を増加させる。1 段階あたりの圧密時間は 3 時間、6 時間、12 時間の場合の 3 ケースを行う。

(2) 定荷重増加率段階荷荷圧密：圧密圧力の増加率  $\Delta p/p$  を 1.37 とし、圧密圧力  $p=9.8\text{kPa}$  から  $p=392\text{kPa}$  まで 15 段階で圧密圧力を増加させる。1 段階あたりの圧密時間は 3 時間、6 時間、12 時間の場合の 3 ケースを行う。

さらに、いずれの場合も  $p=392\text{kPa}$  に達した後に、 $p=589, 869, 1280\text{kPa}$  と荷重増加率 1.47 で急速に圧密圧力を増加させた（圧密時間は一次圧密終了まで）。

図-13 は定速度段階荷荷圧密の場合の圧密圧力と体積比  $f$  の関係である。図-13 のようにセメント添加率が多く荷荷速度がゆっくりであるものほど  $f\text{-log}p$  関係は上方に位置している。すなわち、圧密荷重（したがって粘土試料に作用する有効応力）の増加速度と、経時的に発現するセメンテーション効果とのバランスによって  $f\text{-log} p$  関係は変化し、セメンテーションが発現しやすい場合ほど同じ圧密圧力に対する粘土の間隙比は大きくなっている。

図-14 は定荷重増加率の場合の  $f\text{-log} p$  関係である。図-14 のように、いずれの条件でも  $f$  と  $\log p$  の関係はほぼ直線になっており、セメント添加率が多く荷荷速度がゆっくりであるほどその勾配（圧縮指数）は急になっている。

図-15 は図-13 に示した定速度段階荷荷圧密の結果を(1)式で定義した体積比指数と圧密圧力の関係として表したものである。図-15 中には試料の液性限界と初期間隙比（液性限界の 1.5 倍）から求めた基準曲線を示している。図-15 をみるとセメントを添加することにより、定速度荷荷圧密過程における体積比  $f$  と  $\log p$  関係は基準曲線よりも高い位置に移動し、基準曲線からの離れは荷荷速度が遅いほど大きくなっている。セメント添加量 5% のときは荷荷速度が 1 段階 12 時間するとき基準曲線よりも最大 0.08 程度大きな体積比指数となるが、一方、荷荷速度が 1 段階 3 時間ときはほぼ基準曲線と同様の  $f\text{-log} p$  関係となって、セメンテーションによる影響は見られない。セメント添加量 7% のときは体積比指数は基準曲線よりも 0.12~0.16 大きくなり、これらは図-4 に示した大阪湾洪積粘土の高い体積比指数に近いといえる。さらに、定速段階荷荷圧密過程から急速段階荷荷圧密過程に移行したときの  $f\text{-log} p$  関係をみると、 $f\text{-log} p$  関係が基準曲線に回帰する傾向が見られ、大きな圧縮性を示している。このことも定性的に図-5 にみられる大阪湾洪積粘土の圧縮特性と類似した挙動と考え

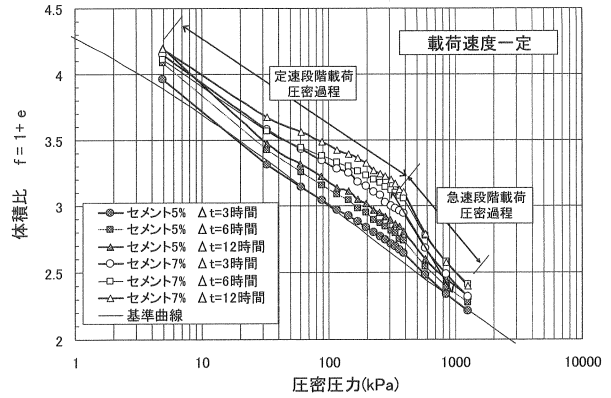


図-13 圧密圧力と体積比の関係（荷荷速度一定）

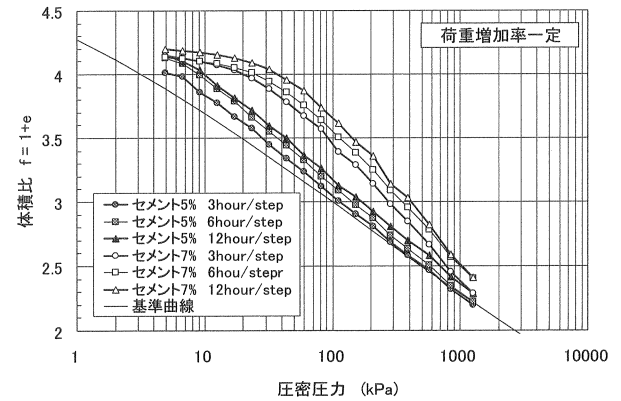


図-14 圧密圧力と体積比の関係（荷重増加率一定）

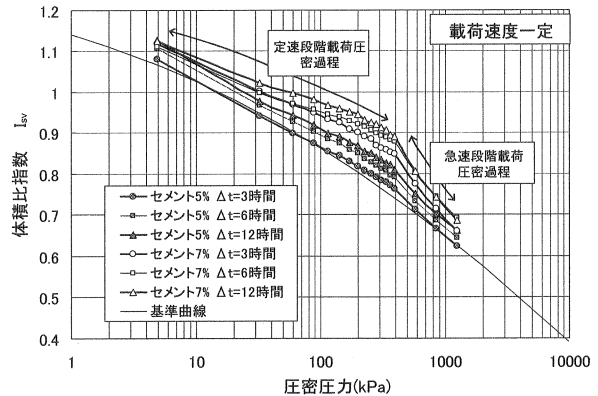


図-15 圧密圧力と体積比指数の関係（荷荷速度一定）

られる。

さて、ここで図-15 の関係と実際の海底地盤の堆積速度の関係について考察してみる。セメント添加率 5% のときに圧密圧力 392kPa までの 15 段階を各段階 3 時間、6 時間、12 時間で荷荷すると、392kPa に達したときの時間はそれぞれ 45 時間、90 時間、180 時間となる。(9)式を用いて、それぞれの養生時間がセメントを添加しない場合にどれだけの時間に相当するか計算する。 $k=0.40, k^*=1.55, t_0=3$  時間とし、さらに海底地盤において一次圧密終了に平均 0.5 年を要すると仮定すると（実際の海底地盤では堆積時

の層厚によって一次圧密終了時間が異なるため平均を考  
える。また、荷重は非常にゆっくりなので圧密係数として  
は過圧密領域の圧密係数を用いる)、45 時間は、

$$0.5 \text{ 年} \times (45/7.2)^{1.55^{0.4}} = 607 \text{ 年}$$

となり、同様に 90 時間、180 時間はそれぞれ 8,570 年、  
124,500 年に相当している。このように考えると、図-15  
におけるセメント添加率 5%、各段階 3 時間、6 時間、12  
時間の荷重は、セメンテーションによる強度を発現しなが  
ら堆積し、それぞれ若い沖積粘土地盤、古い沖積粘土地盤、  
洪積粘土地盤を形成したときの間隙比と圧密圧力の関係  
をある程度再現していると考えられる。

一方、セメント添加率 7%の場合について、同様に実際  
の地盤での相当時間を計算すると、もっとも短い 45 時間  
の場合で  $8 \times 10^{43}$  年という非現実的な数字となる。セメン  
ト添加率 7%に相当する大きさのセメンテーションの発現  
は、式(4)、式(5)で表現されるセメンテーションを前提に  
すれば、現実には起こりえない大きさといえる。

#### 4 まとめ

原位置で高い間隙比を有しながら堆積している大阪湾  
洪積粘土の堆積過程を検討するため、土の力学特性に大き  
な影響を与えない少量のセメントを添加することで、自然  
地盤の堆積過程に発現する年代効果を室内において短時  
間で再現する実験手法を検討した。一連の試験の結果、以  
下のことがわかった。

- 1) 粘土の力学特性に大きな影響を与えない少量のセメン  
トを添加することで、自然地盤の堆積過程に発現する年  
代効果を室内において短時間で再現する実験手法を検  
討した。
- 2) セメント添加率 5%の場合、一定の圧密圧力のもとで圧  
密降伏圧力は時間の対数に比例して増加する。圧密降伏  
圧力の増加傾向からセメンテーションの促進効果を求  
めると、常温の場合の約 4 乗のスピードで強度発現が起  
こっている。
- 3) 少量のセメントを添加した試料において圧密圧力の増  
加とセメンテーションによる固化が同時に起こるとき  
の体積比と圧密圧力の関係を調べた。荷重増加率一定で  
圧密すると圧密圧力の対数と体積比が直線的な関係を  
示すが、間隙比はセメント添加率が大きく荷重速度がゆ  
っくりであるほど大きくなる。荷重速度一定の場合も添  
加率が大きく荷重速度がゆっくりなほど体積比は大き  
くなり、 $f\text{-log } p$  の勾配も緩やかになる。
- 4) セメント添加率を 5%とし、1 段階の圧密圧力増分を  
27.7kPa として、各段階の荷重時間を 3 時間、6 時間、  
12 時間として 9.8kPa から 392kPa まで 15 段階で荷重し  
たときの圧密中のセメンテーション効果を圧密降伏圧  
力から評価すると、それぞれの荷重時間で、若い沖積粘  
土地盤、古い沖積粘土地盤、洪積粘土地盤が堆積する過  
程を再現していると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Bjerrum, L.: Problems of Soil mechanics and construction  
of soft clays, states-of-the-art report, Proceedings of 8th  
International Conference on Soil Mechanics and  
Foundation Engineering, Vol.3, pp.111-159, 1973.
- 2) Bjerrum, L.: Engineering geology of Norwegian normally  
consolidated marine clays as related to settlements of  
buildings, *Geotechnique*, Vol.17, pp.83-118, 1967.
- 3) 土田孝: 圧密における理論と実際—洪積粘土地盤の  
沈下予測問題を例にとつて—, 土と基礎, 第 49 巻, 第  
6 号, pp.1-4, 2001.
- 4) Lambe and Whitman: Soil Mechanics, John Wiley & Sons,  
Inc. pp.320, 1969.
- 5) 小川富美子, 松本一明: 港湾地域における土の工学的  
諸係数の相関性, 港湾技術研究所報告, 第 17 巻第 3  
号, pp.7-20, 1978.
- 6) 土田孝: 海成粘土地盤の自然間隙比と土被り圧の関係  
に関する統一的な解釈, 地盤工学会論文報告集, Vol.41,  
No.1, pp.127-143, 2001.
- 7) Tsuchida, T.: Mechanical properties of Pleistocene clay  
and evaluation of structure due to aging, *Coastal  
Geotechnical Engineering in Practice*, Proceedings of  
International Symposium on Coastal Geotechnical  
Engineering in Practice, IS-Yokohama2000, Vol.2,  
pp.43-83, 2000.
- 8) Tan, Y. X., Miyazaki, Y. and Tsuchida, T. : Practices of  
reused dredgings by cement treatment, *Soils and  
Foundations*, Vol.41, No.5, pp.129-143, 2001.
- 9) 中瀬明男, 小林正樹, 兼近明男: 過圧密粘土の圧密特性,  
港湾空港技術研究所報告, Vol.12, No.1, 1973.
- 10) Tan, Y. X. and Tsuchida, T. : The development of shear  
strength for sedimentary soft clay with respect to aging  
effect, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.6, pp.13-24,  
1999.
- 11) 竹信正寛・土田孝・近井玲子: 炭酸カルシウムの添  
加と高温養生による広島港粘土の年代効果の再現, 第  
40 回地盤工学研究発表会, Vol.40, 2005, pp. 301-302.

(2007 年 6 月 29 日 受付)